

Prospección eléctrica en placeres fluvio-glaciales de oro del distrito de Ananea (departamento de Puno, Perú suroriental)

M. CARN⁽¹⁾, G. LAUBACHER⁽²⁾, J.L. GELOT⁽³⁾, E. VALDIVIA⁽⁴⁾,
M. DELGADO⁽⁵⁾, M. FORNARI⁽⁶⁾, G. HERAIL⁽⁶⁾, R. JUNGBLUTH⁽⁴⁾, O. MACEDO⁽⁷⁾,
R. MAROCCO⁽⁸⁾, W. RODRIGUEZ⁽⁴⁾, J. ZEGARRA⁽⁴⁾ y E. CAMONES⁽⁴⁾

Resumen : La mina de oro de Pampa Blanca, en la Cordillera oriental del Sur del Perú, es el más grande placer fluvio-glacial de oro que se conoce en los Andes. Se exponen aquí los resultados de un estudio geoeléctrico realizado mediante 64 sondeos eléctricos con la finalidad de estimar el espesor y la geometría de los depósitos fluvio-glaciales de Pampa Blanca que son potencialmente auríferos. Los sondeos se hicieron generalmente con una malla de 500 metros pero una línea central se realizó con sondeos cada 250 metros. Dos sondeos, localizados a proximidad de una profunda quebrada llamada Ccuellaccacca y que recorta los depósitos fluvio-glaciales del Cuaternario y lacustres del Plioceno, permitieron controlar los datos geoeléctricos por la geología. Valores eléctricos directos se han obtenido también en otros sondeos. Entre los depósitos fluvio-glaciales y el substrato plioceno y/o paleozoico se midieron fuertes contrastes de resistividad. Los datos obtenidos permiten dibujar mapas de iso-resistividades y de isopacos del material fluvio-glacial. Desde el borde hacia el centro de la depresión de Pampa Blanca, el espesor del material fluvio-glacial varía de unos metros a más de 70 metros. Las resistividades disminuyen del borde NE hacia el centro de la depresión y este gradiente geoeléctrico parece deberse a un cambio lateral de granulometría. Se ha calculado, para los depósitos fluvio-glaciales de Pampa Blanca, un mínimo de 400.000.000 m³ de material potencialmente aurífero.

Palabras claves : Prospección geoeléctrica - Oro - Placer - Fluvio-glacial - Plio-Cuaternario - Cordillera suroriental - Perú.

Résumé : Prospection électrique de placers fluvio-glaciaires à or dans le district d'Ananea (département de Puno, sud-est du Pérou). Le gisement d'or de Pampa Blanca, situé dans la Cordillère orientale du sud du Pérou, est le plus grand placer fluvio-glaciaire d'or connu dans les Andes. Nous exposons ici, en complément des données géologiques de surface, les résultats d'une étude de 64 sondages électriques, réalisés pour estimer l'épaisseur et la géométrie des accumulations fluvio-glaciaires. La maille des sondages est généralement de 500 m sauf sur un profil central où les sondages sont distants de 250 m. Les résistivités obtenues ont été contrôlées par deux sondages électriques réalisés à proximité d'un profond ravin, la quebrada ccuellaccacca, creusé dans le matériel fluvio-glaciaire quaternaire et palustre pliocène. Des contrôles complémentaires, plus limités, ont été obtenus par d'autres sondages. Les contrastes géo-électriques

(1) Antenne ORSTOM, CMS B.P. 147, 22302 Lannion.

(2) ORSTOM, B.P. 5045, 34032 Montpellier Cedex, France.

(3) Bureau de Recherches géologiques et minières, avenue Concyr, 45000 Orléans-la-Source Cedex 2, France.

(4) Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Pablo Bermudez 211, Lima 11, Perú.

(5) Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Lima, Perú.

(6) Mission ORSTOM, Cajon Postal 9214, La Paz, Bolivie.

(7) Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Arequipa, Perú.

(8) Mission ORSTOM, Apartado Postal 6596 CCI, Quito, Equateur.

entre le fluvioglaciaire et son substratum pliocène et/ou paléozoïque ont permis l'établissement de cartes d'isoresistivités et d'isopaques du matériel fluvioglaciaire. L'épaisseur de ce matériel atteint en un endroit plus de 70 m. On constate aussi qu'entre la bordure NE et la zone centrale de la dépression de Pampa Blanca, la résistivité décroît fortement. Cela semble correspondre à une amélioration progressive du classement par reprise et lavage du matériel glaciaire. Un calcul simple du volume suggère, pour Pampa Blanca, un minimum de 400 000 000 m³ de matériel fluvioglaciaire potentiellement aurifère.

Mots-clés : Prospection électrique - Or - Placer - Fluvioglaciaire - Plio-Quaternaire - Cordillère sud-orientale - Pérou.

Abstract : **Electrical Prospecting of Fluvioglacial Gold Placers in the District of Ananea (Department of Puno, Southeastern Peru).** *In the Eastern Cordillera of Southern Peru, the Pampa Blanca gold mine is the main fluvioglacial placer known in the Andes. We present here results of a geoelectrical study of 64 vertical electrical soundings which were carried out to complement geological studies and to estimate thickness and geometry of the potentially auriferous morains and outwash deposits of Pampa Blanca. The grid of the sounding network was commonly of 500 m except along a central line where soundings were performed every 250 m. Close to a deep cut-off, the Ccuellaccacca quebrada, where the Quaternary fluvioglacial and Pliocene lacustrine strata are well exposed, two electrical vertical soundings allowed us to compare electrical data and rock outcrops. Direct geoelectrical data were also obtained in other soundings. High contrasts in geoelectrical values were obtained between the Quaternary fluvioglacial deposits and the Pliocene and/or Paleozoic strata and plotted in an isoresistivity map. Combination of geological and electrical data allowed us to construct an isopach map of the fluvioglacial strata. From the northeastern border to the center of the Pampa Blanca depression, resistivities decrease strongly whereas thicknesses of the fluvioglacial strata also change from a few meters to more than 70 m. This decreasing gradient should be related to a progressive improvement of granulometric classification by reworking of glacial material. A single volum calculation suggests a minimum of 400 000 000 m³ of potential auriferous morains and outwash deposits in Pampa Blanca area.*

Key words : Geoelectrical Prospecting - Gold - Placer - Fluvioglacial - Plio-Quaternary - Southeastern Cordillera - Peru.

INTRODUCTION

Los placeres fluvioglaciales de la zona de Ananea se ubican en la vertiente suroeste de la Cordillera oriental a unos 70 km al norte del lago Titicaca (fig. 1), y a una altitud comprendida entre 4 500 m y 5 000 m. Estos placeres han sido explotados por lo menos desde los tiempos de la Conquista. Durante el último siglo, estos yacimientos se explotaron en Ananea (antiguamente San Antonio de Poto) y en Pampa Blanca a escala industrial por monitores (Sociedad Aurífera de San Antonio de Poto de 1927 a 1937) y por draga (Natomas Company of Perú de 1960 a 1972, SAENZ CHAVEZ 1964). A poca distancia hacia el norte, en el macizo del Nevado Ananea (fig. 2) se explotan vetas de cuarzo aurífero de tipo "manto" (minas de la Rinconada, Gavilan de Oro,... FORNARI *et al.*, 1988) emplazadas en una secuencia de cuarcitas y pizarras

del Paleozoico inferior (formación Ananea : LAUBACHER, 1978). Trabajos geológicos recientes (FORNARI *et al.*, 1982 ; 1988, DELAUNE *et al.*, 1989) han permitido proponer un modelo de génesis de los placeres de Ananea - Ancocala, en el cual se demuestra que 1) las fuentes del oro detrítico son las mineralizaciones pre-carboníferas emplazadas en pizarras y cuarcitas del Paleozoico inferior de la Cordillera de Apolobamba ; 2) solo el material glacial y derivado antiguo y/o reciente es aurífero ; las otras formaciones recientes se revelaron totalmente estériles.

Un objetivo de interés económico, era la determinación del espesor y volumen del material glacial para estimar mejor el potencial del yacimiento. Para tal fin, los escasos cortes naturales y la profundidad siempre inferior a 10 m de los pozos y perforaciones realizados en el pasado eran insuficientes y se optó por una prospección eléctrica con el método clásico Schlumberger.

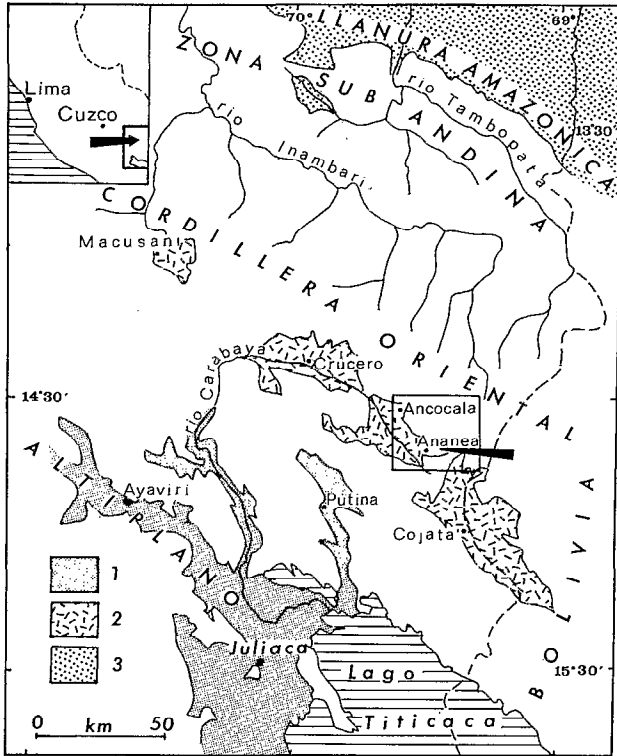


Fig. 1. — Ubicación de la zona estudiada. 1 = depósitos cuaternarios del Altiplano ; 2 = cuencas plio-cuaternarias en la Cordillera oriental ; 3 = depósitos cuaternarios de la llanura amazónica.

Situation de la zone étudiée 1 = dépôts quaternaires de l'Altiplano ; 2 = bassins plio-quaternaires de la Cordillère orientale ; 3 = dépôts quaternaires de la plaine amazonienne.

EL CONTEXTO GEOLOGICO DEL YACIMIENTO

La geología de la zona fué descrita detalladamente en varias publicaciones (LAUBACHER, 1978 ; FORNARI *et al.*, 1980, 1981, 1982, FORNARI y BONNEMAISON, 1984 ; FORNARI *et al.*, 1988 ; BONNEMAISON *et al.*, 1983 y 1985) y aquí presentaremos solo los grandes rasgos geológicos de la zona estudiada.

Los placeres de San Antonio de Poto y de Pampa Blanca ocupan la parte este de la cuenca de Ananea-Ancocala (fig. 2) comprendida entre el macizo del Nevado Ananea (5 800 m) al norte, constituido de pizarras y cuarcitas del Paleozoico inferior y relieves más bajos (hasta 5 100 m) al sur, constituidos esencialmente por areniscas del Paleozoico superior (formación Ambo). La zona de Pampa Blanca se presenta como una depresión disimétrica limitada al noroeste y al este, por los profundos valles glaciales de la Rinconada y de Lacaraqui. En discordancia sobre el substrato paleozoico se ha reconocido la formación Arco-Aja constituida por un miembro inferior con sedimentos palustres generalmente finos y un miembro superior aluvial y conglomerádico. En los cortes

naturales, el espesor de la formación Arco-Aja varía de pocos metros a cerca de 50 metros. Una edad K/Ar de 3.8 M.a. (LAUBACHER *et al.*, 1984 ; BONHOMME *et al.*, 1988) obtenido sobre una muestra de un nivel cinerítico ubicado en la parte superior del miembro inferior permite atribuir la formación Arco-Aja al Plioceno y correlacionarla con la formación La Paz (DOBROVOLNY, 1962 ; SERVANT, 1977 ; LAVENU, 1986). En discordancia y frecuentemente encavados en el Plioceno y el Paleozoico, vienen depósitos glaciales testigos de extensos periodos de glaciación cuaternaria (BONNEMAISON *et al.*, 1983, 1985). De la glaciación Ancocala, la más antigua visible en el area de Pampa Blanca, no queda ningún rasgo morfológico, pero su material se reconoce bien por su color ocre debido a la alteración meteórica que lo afecta. Los eventos glaciales más recientes (glaciación Chaquiminas) corresponden a varios episodios de avances y retrocesos : arcos morrénicos, abanicos fluvio-glaciales bien conservados, constituidos de material poco alterado. La sección estratigráfica del corte natural de Ccuellaccacca, a 1 km al NE de la draga hundida de Pampa Blanca (fig. 2), aunque incompleta, expone la mejor sucesión estratigráfica local.

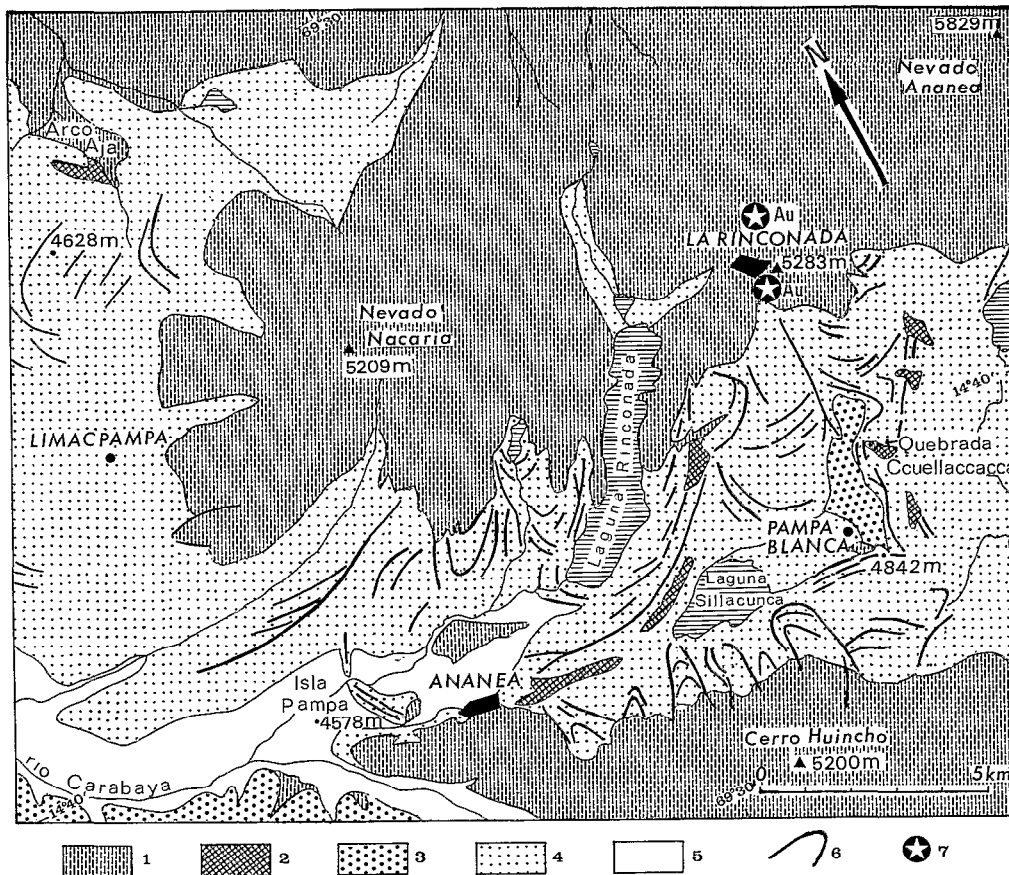


Fig. 2. — Principales formaciones recientes de la zona de Ananea. 1 = Paleozoico ; 2 = depósitos palustres de la formación Arco-Aja ; 3 = depósitos fluvio-glaciales antiguos (glaciación Ancocala) ; 4 = depósitos glaciales y fluvio-glaciales recientes (glaciación Chaquiminas) ; 5 = depósitos aluviales recientes ; 6 = arcos morrénicos ; 7 = minas de oro primario.

Principales formations récentes de la zone d'Ananea. 1 = Paléozoïque ; 2 = dépôts palustres de la formation Arco-Aja ; 3 = dépôts fluvio-glaciaires anciens (glaciación Ancocala) ; 4 = dépôts glaciaires et fluvio-glaciaires récents (glaciación Chaquiminas) ; 5 = alluvions récentes ; 6 = arcs de moraines ; 7 = mines d'or primaire.

PROSPECCION ELECTRICA CON EL METODO SCHLUMBERGER

La finalidad de los sondeos eléctricos (S.E.) es averiguar la distribución vertical de la resistividad bajo el punto sondeado. El método ha sido descrito en muchas obras (SCHUMBERGER, 1920 ; LASFARGUES, 1957 ; PASCAL, 1970 ; ORELLANA, 1972 ; KOEFOED, 1979). En Pampa Blanca se realizaron 64 sondeos eléctricos

con 2 equipos (véase el apéndice), respetando en lo posible una red pre-establecida. La zona dispone de mapas topográficos al 1/100.000 IGM, Perú) y 1/25.000 (Ministerio de Agricultura, Perú). Sin embargo, el establecimiento de una red cuadrada (fig. 3) de 500 m de malla y la localización precisa de los puntos de sondeos, necesitó un levantamiento topográfico específico. La red comprende líneas con orientaciones respectivas N157°E y N065°E, letradas y numeradas : por ejemplo E/50, I/52,...

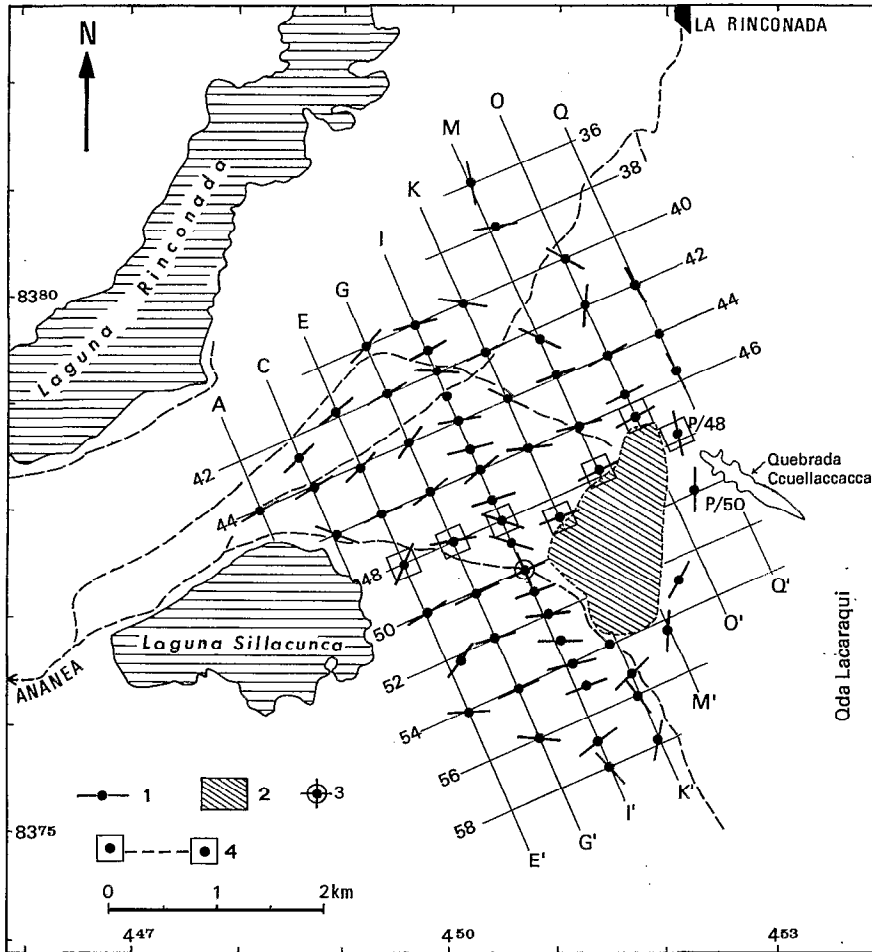


Fig. 3. — Red de los sondeos eléctricos. 1 = punto de sondeo y orientación de la línea de sondeos; 2 = zona explotada por la draga; 3 = sondeo en cruz 1/50; 4 = perfil proyectado de la figure 7.

Réseau des sondages électriques. 1 = point de sondage et orientation de la ligne de sondages; 2 = zone exploitée par la drague; 3 = sondage en croix 1/50; 4 = profil projeté de la figure 7.

Interpretación de los sondeos eléctricos

La interpretación de los sondeos eléctricos se realizó mediante un método gráfico de curvas log/log con las medidas en $AB/2$ (en metros) en abscisa y los datos de resistividad (en ohms \times metro = $\Omega \cdot m$) en ordenada (fig. 4 y 5). Las curvas obtenidas se comparan con curvas patrones (C.P.).

En el caso de curvas de "3 capas simples" se procedió por superposición directa con C.P. del catálogo "Standard Graphs for Resistivity Prospecting" (Rijks-waterstaat, 1975).

En el caso de curvas de "3 capas más complejas" o de "3+n" capas se procedió por reducción (método del

punto auxiliar) y superposición. Un co-autor (M. Carn) interpretó primero todas las curvas de este tipo usando los ábacos de CAGNIARD (1952) que son de tres tipos: $\rho_3=0$; $\rho_3=1$; $\rho_3=\infty$. Luego, en forma independiente, otro co-autor (J.L. Gelot) comprobó la interpretación de las curvas algo problemáticas con ábacos tipo Ebert, modificados por ORELLANA (1972). Esta doble interpretación permitió comparar la eficiencia de ambos métodos, y reducir el efecto subjetivo en la interpretación.

Un último control fué realizado sobre los datos del perfil central II' (malla de 250 m, fig. 3) por computadora usando un programa de calculo de DAVIS (1979), con resultados en buen acuerdo con las interpretaciones por el método gráfico.

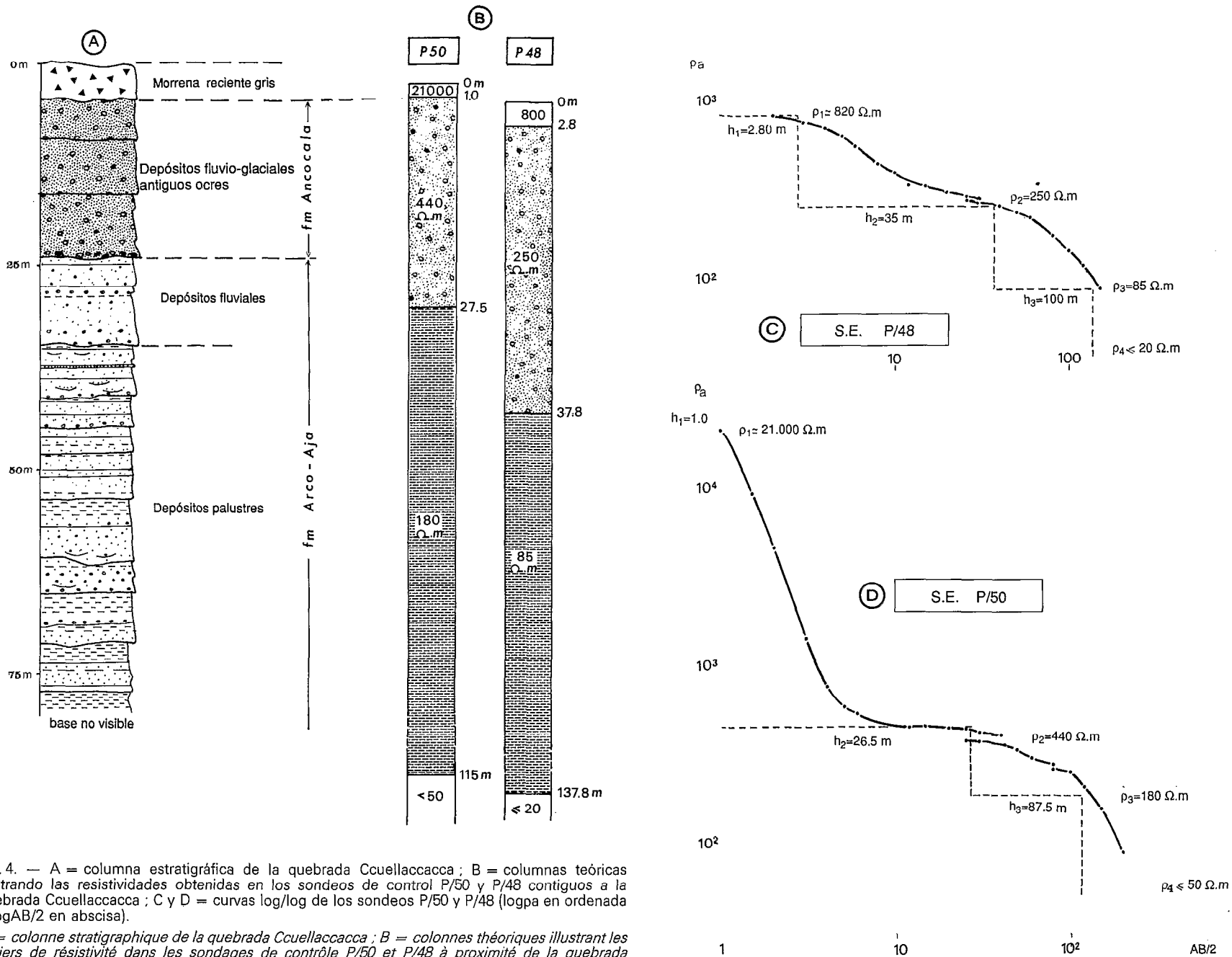


Fig. 4. — A = columna estratigráfica de la quebrada Cuellaccacca ; B = columnas teóricas ilustrando las resistividades obtenidas en los sondeos de control P/50 y P/48 contiguos a la quebrada Cuellaccacca ; C y D = curvas log/log de los sondeos P/50 y P/48 (log₁₀ρ_a en ordenada y logAB/2 en abscisa).

A = colonne stratigraphique de la quebrada Cuellaccacca ; B = colonnes théoriques illustrant les paliers de résistivité dans les sondages de contrôle P/50 et P/48 à proximité de la quebrada Cuellaccacca ; C = courbes log/log à partir des sondages P/50 et P/48 (log₁₀ρ_a en ordonnée et logAB/2 en abscisse).

Calibración de los sondeos por la geología

No pudimos disponer de los datos litoestratigráficos de las perforaciones realizadas en Pampa Blanca por la Natomas Company of Peru que, de todos modos, eran de poca profundidad. Tampoco se pudo realizar una perforación paramétrica de calibración del método. Para correlacionar los datos geoelectricos con la estratigrafía del area, fuimos así conducidos a ubicar 2 S.E. (P/48 y P/50) a proximidad inmediata del corte estratigráfico de la quebrada Ccuellaccacca (fig. 2). Al comparar la columna estratigráfica (fig. 4a) de dicha quebrada con los datos de los 2 S.E. de calibración (fig. 4b), se nota que :

- las formaciones más recientes (morrenas, material fluvioglacial y aluvial derivado) no se diferencian eléctricamente y presentan valores de ρ entre 440 y 250 $\Omega \cdot m$. La precisión de los espesores calculados mediante los S.E. P/48 y P/50 (son respectivamente 27.5 m y 37.8 m para los depósitos morrénicos, fluvioglaciales y aluviales) parece buena, dado que en la quebrada misma se midió un espesor global de dichas formaciones de 35 metros ;
- la formación Arco-Aja, más conductora, muestra una resistividad más fuerte en sus niveles superiores arenosos y microconglomerádicos (entre 85 y 180 $\Omega \cdot m$) que en sus capas inferiores (entre 20 y 50 $\Omega \cdot m$) generalmente pelíticas. No se llegó al substrato pizarroso de la formación Ananea, lo que signi-

fica que la potencia de la formación Arco-Aja es mayor a 140 metros en este punto.

Nuestra calibración esta en buen acuerdo con los datos obtenidos en los sondeos eléctricos E/42, G/40 y I/40 (fig. 3) igualmente controlados por la geología. También se realizó un S.E. directamente sobre las pizarras de la formación Ananea (M/36) para las cuales se midieron valores de resistividad comprendidos entre 250 y 750 $\Omega \cdot m$.

Limitaciones del método eléctrico

La prospección eléctrica necesita siempre un control por datos de campo y la colaboración estrecha entre geólogos y geofísicos. En la naturaleza son muy raras las condiciones ideales (sedimentos perfectamente homogéneos, contactos horizontales,...) para una perfecta aplicación de métodos basados en leyes de física teórica y se admite que una precisión de 10 a 15% es un buen resultado.

RESULTADOS

El sondeo central en cruz I/50 (fig. 5)

En el punto I/50, que ocupa una posición central en el area estudiada, se hicieron dos sondeos en cruz

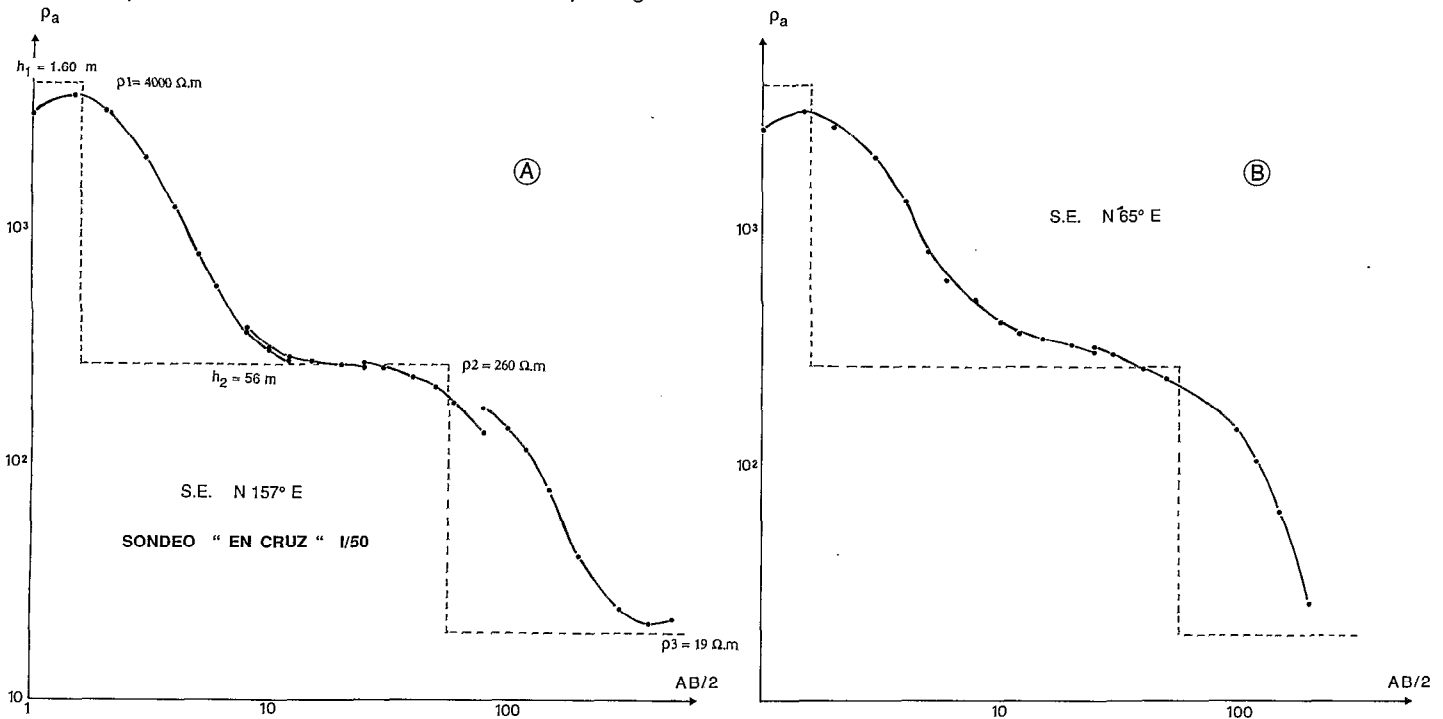


Fig. 5. — Curvas log/log obtenidas en el sondeo en cruz I/50 (log ρ_a en ordenada y logAB/2 en abscisa). La curva A corresponde al S.E. orientado N157°E y la curva B al S.E. orientado N065°E.

Courbes log/log obtenues dans le sondage en croix I/50 (log ρ_a en ordonnée et logAB/2 en abscisse). La courbe A correspond au S.E. orienté N157°E et la courbe B au S.E. orienté N065°E.

con orientaciones respectivas N157°E y N065°E (fig. 3 y 5), a fines de obtener datos sobre la "anisotropía" lateral de los depósitos recientes. Los valores respectivos de resistencia transversal

$$T = \sum_{i=1}^n E_i \cdot \rho_i$$

y de conductancia longitudinal

$$S = \sum_{i=1}^n E_i / \rho_i$$

son muy parecidos ($T_1=15\ 050$; $T_2=17\ 600$; $S_1=0.196$; $S_2=0.200$) (E_i y ρ_i = espesor y resistividad de la capa i).

Sin embargo, se notan algunas diferencias entre las dos curvas. La excavación de la draga, con aproximadamente 5 metros de profundidad media, que se ubica al este del sondeo con orientación N065°E, podría explicar dichas diferencias.

La curva del S.E. con orientación N° 157°E tiene una forma en escalera descendente (fig. 5), típica de la mayoría de las curvas de la zona de Pampa Blanca. Una capa superficial resistente ($\rho_1=4\ 000\ \Omega \cdot m$) y delgada ($h_1=1.60\ m$) corresponde a material glacial situado arriba del nivel freático. Sin embargo, un análisis más fino de los 2 primeros puntos de medición permite distinguir, dentro de la capa de 1.60 m, un horizonte muy superficial ($h_1=0.60$) con una resistividad aproximada de $2\ 000\ \Omega \cdot m$. Se trata de un suelo que no fué interpretado en los otros sondeos. Debajo de 1.60 m, la curva sufre un descenso fuerte que pasa a una plataforma horizontal bien marcada ($\rho_2=260\ \Omega \cdot m$) : esto revela una formación potente ($h_2=56\ m$) que interpretamos como depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y aluviales no diferenciables aquí por el método eléctrico. Luego sigue una nueva bajada de la curva que parece corresponder a sedimentos palustres de la formación Arco-Aja, muy potentes y más conductores ($\rho_3=19\ \Omega \cdot m$) que los depósitos subyacentes. Los dos últimos puntos de medición ($AB/2=140\ m$ y $150\ m$) marcan una inflexión de la curva que se puede interpretar de dos maneras : 1) si es el inicio de una subida de la curva, refleja probablemente la influencia eléctrica de la formación Ananea, lo que permite inferir una potencia del orden de 200 m para la formación Arco-Aja ; 2) si el último punto corresponde al principio de una plataforma, indicando la resistividad verdadera de la formación Arco-Aja, la potencia de dicha formación es superior a 200 m, sin poder decir de cuánto.

Línea I de sondeos cada 250 m (fig. 3 y 8)

A partir del sondeo en cruz, y a lo largo de una transversal (línea I), se realizaron sondeos cada 250 m que han servido de armazón a las líneas de sondeos perpendiculares y permitido un control adicional de los datos de resistividad.

Resistividades de las formaciones geológicas de Pampa Blanca

Solo se exponen aquí los datos de resistividad extremos y promedios para que sirvan de referencia en futuros trabajos.

En la morrena reciente del punto K/58, derivada de areniscas de la formación Ambo (Mississippiano), $\rho = 1300\ \Omega \cdot m$.

En los depósitos recientes morrénicos, fluvio-glaciales y aluviales de Pampa Blanca electricamente indiferenciados, ρ esta entre 195 y $2\ 000\ \Omega \cdot m$. Se calculó el promedio de resistividad (ρ_m) en los perfiles :

C	(3 S.E.)	$\rho_m = 473\ \Omega \cdot m$
E	(7 S.E.)	$\rho_m = 408\ \Omega \cdot m$
G	(9 S.E.)	$\rho_m = 498\ \Omega \cdot m$
I	(14 S.E.)	$\rho_m = 422\ \Omega \cdot m$
K	(8 S.E.)	$\rho_m = 552\ \Omega \cdot m$
M	(6 S.E.)	$\rho_m = 471\ \Omega \cdot m$
O	(6 S.E.)	$\rho_m = 686\ \Omega \cdot m$

La resistividad promedio de los depósitos recientes, tomando en cuenta 53 S.E., es aproximadamente de $500\ \Omega \cdot m$.

En los depósitos palustres finos de la formación Arco-Aja, la resistividad va de 10 a $85\ \Omega \cdot m$, con ρ_m de $35\ \Omega \cdot m$ en 50 S.E. En la parte superior de dicha formación, más gruesa y hasta conglomerádica, la resistividad varia entre $85\ \Omega \cdot m$ y $290\ \Omega \cdot m$ pero es posible que estos valores incluyen también términos de material fluvio-glacial subyacente cuando esta muy evolucionado.

En las pizarras y cuarcitas subordinadas de la formación Ananea se obtuvo valores de ρ entre 200 y $730\ \Omega \cdot m$.

Mapa de resistividades aparentes de los depósitos glaciales (fig. 6)

Muchas curvas de los S.E. presentan una forma en escalera descendente, con plataforma bien marcada similar a la de las curvas del sondeo en cruz descrito más arriba. Los puntos de medición con $AB/2$ de esta plataforma corresponden precisamente a la "verdadera" resistividad (ρ_v) de los depósitos recientes (morrénicos, fluvio-glaciales y aluviales). Eligiendo un $AB/2 = 20\ m$ (profundidad a la cual existe material glacial en la mayor parte de la depresión de Pampa Blanca) se ha establecido un mapa de resistividades "verdaderas" de estos depósitos. Al analizar este mapa se nota :

— que la faja "conductora" ($\rho < a\ 400\ \Omega \cdot m$) se ensancha del NE hacia el SW y S. Esta geometría sugiere un transporte del material desde el macizo del Nevado Ananea al norte, en conformidad con su naturaleza y petrografía.

— un gradiente eléctrico muy fuerte en las formaciones fluvio-glaciales recientes. De los bordes hacia el centro de la depresión de Pampa Blanca, la resistivi-

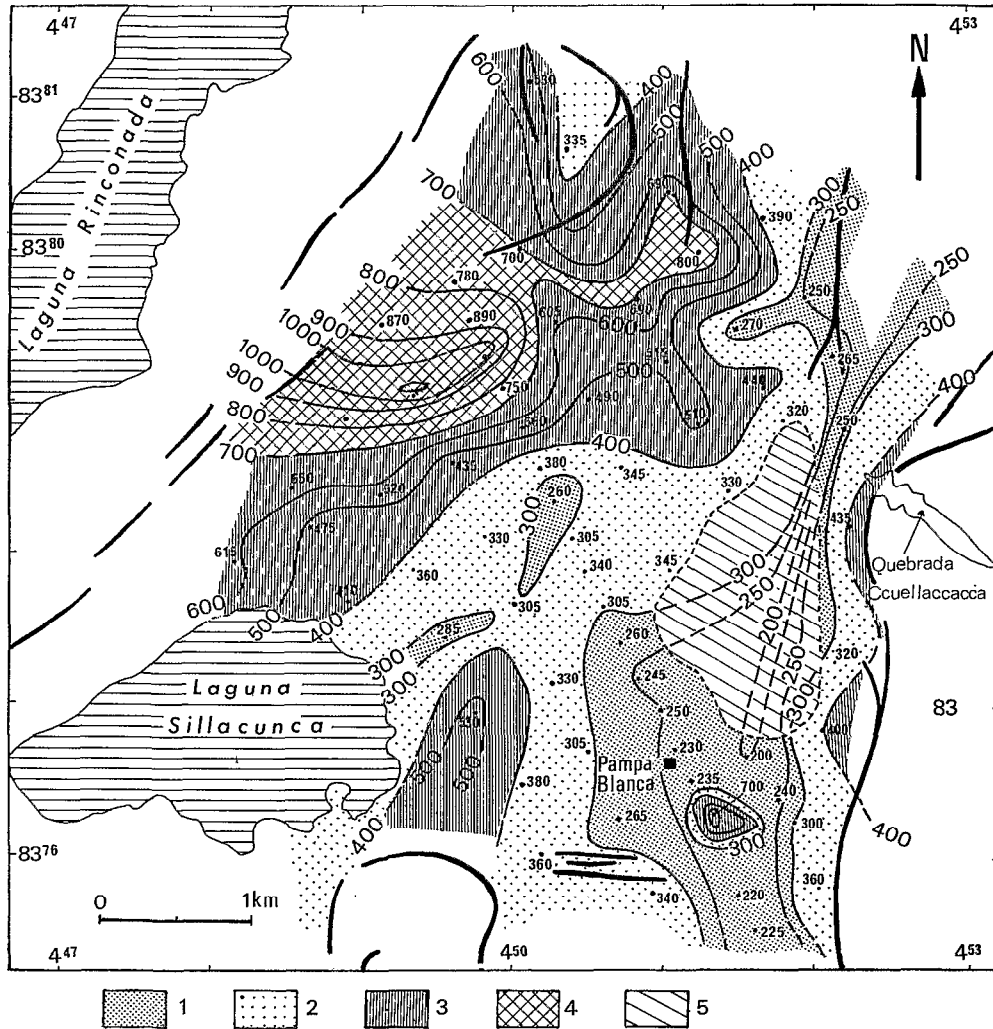


Fig. 6. — Mapa de resistividades aparentes (curvas de isoresistividades con $AB/2 = 20\text{ m}$) de los depósitos glaciares y fluvio-glaciares de la zona de Pampa Blanca. 1 = valores de ρ_a inferiores a $300\ \Omega\cdot\text{m}$; 2 = valores entre $300\ \Omega\cdot\text{m}$ y $400\ \Omega\cdot\text{m}$; 3 = valores entre $400\ \Omega\cdot\text{m}$ y $700\ \Omega\cdot\text{m}$; 4 = valores superiores a $700\ \Omega\cdot\text{m}$; 5 = zona explotada por la draga.

Carte des résistivités apparentes (courbes des isorésistivités) des dépôts glaciaires et fluvio-glaciaires de la zone de Pampa Blanca. 1 = valeurs de ρ_a inférieures à $300\ \Omega\cdot\text{m}$; 2 = valeurs entre $300\ \Omega\cdot\text{m}$ et $400\ \Omega\cdot\text{m}$; 3 = valeurs entre $400\ \Omega\cdot\text{m}$ et $700\ \Omega\cdot\text{m}$; 4 = valeurs supérieures à $700\ \Omega\cdot\text{m}$; 5 = zone exploitée par la drague.

dad decrece de más de $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ a $195\ \Omega\cdot\text{m}$ (fig. 6, 8 y 9). Las resistividades altas ($\rho > 400\ \Omega\cdot\text{m}$), se observan generalmente en la parte externa de la depresión, al NW, SE y S de la zona dragada: caracterizan morrenas, con muy alto porcentaje de arcilla, derivadas de esquistos y cuarcitas del Paleozoico. Las resistividades bajas (195 a $400\ \Omega\cdot\text{m}$) de la parte central de la depresión, caracterizan espesos depósitos fluvio-glaciares, con estratificación visible, canales anchos y poco profundos con niveles de cantos. Presentan un porcentaje mucho más alto de silt, arena y microconglomerados y menos arcilla y bloques que las morrenas de las cuales derivan. El

decrecimiento de la resistividad, desde el borde NE hacia el centro de la depresión, sugiere una correlación entre resistividad y grado de removilización del material glacial. La disimetría eléctrica transversal, que coincide con la disimetría topográfica, sugiere también que los mayores aportes vinieron desde el valle de Rinconada al norte.

— que la zona dragada se localiza dentro de esta faja "conductora" o mejor dicho en depósitos fluvio-glaciales proximales derivados directamente de las morrenas auríferas. Dichas morrenas han sido arrastradas del Paleozoico mineralizado en oro (minas de La Rinconada y de Gavilan de oro, FORNARI *et al.* 1982 y

1988) por glaciales de la vertiente sur del macizo de Ananea. En este material glacial, la faja "conductora" debe considerarse como una zona de mayor interés para la prospección del oro.

Perfiles geoelectricos (fig. 7 y 8) y mapa de isopacos de los depósitos glaciales (fig. 9)

Se presentan siete perfiles geoelectricos a lo largo de las lineas C, E, G, I, K, M y O de dirección N157°E en figura 8 y un perfil perpendicular a ellos, según la línea 48 de dirección N065°E en figura 7.

Se nota una muy buena correlación entre los resultados obtenidos por los sondeos eléctricos, la topografía y las observaciones geológicas de campo en las extremidades NW de los perfiles E, G, I, K y 48 (SE E/42, G/48, I/40, K/40 y P/48). Hay también una buena coherencia general entre los espesores calculados.

No se ha determinado ni el espesor de la formación Arco-Aja, ni la geometría de su piso. Sin embargo, en el punto I/50, la formación Arco-Aja sobrepasa los 200 m considerando AB/4 para el calculo del espesor. El miembro palustre de la formación Arco-Aja, presenta un gradiente de resistividad (ρ desde $10 \Omega \cdot m$ hasta $85 \Omega \cdot m$) que probablemente corresponde a variaciones litológicas. A la vertical de los puntos K/40, M/38 y O/40 se ha detectado, entre el material glacial reciente y la formación Arco-Aja palustre, capas con resistividades de 90 hasta $250 \Omega \cdot m$ que se interpretan como conglomerados aluviales del miembro superior de la formación Arco-Aja (FORNARI *et al.*, 1981). Pero, no es excluido que, localmente, podrían corresponder a depósitos fluvio-glaciales subyacentes muy evolucionados.

La topografía irregular del piso de los depósitos fluvio-glaciales auríferos se debe a una erosión, aluvial o glacial, posterior a la formación Arco-Aja, lo que puede explicar los pocos remanentes del miembro

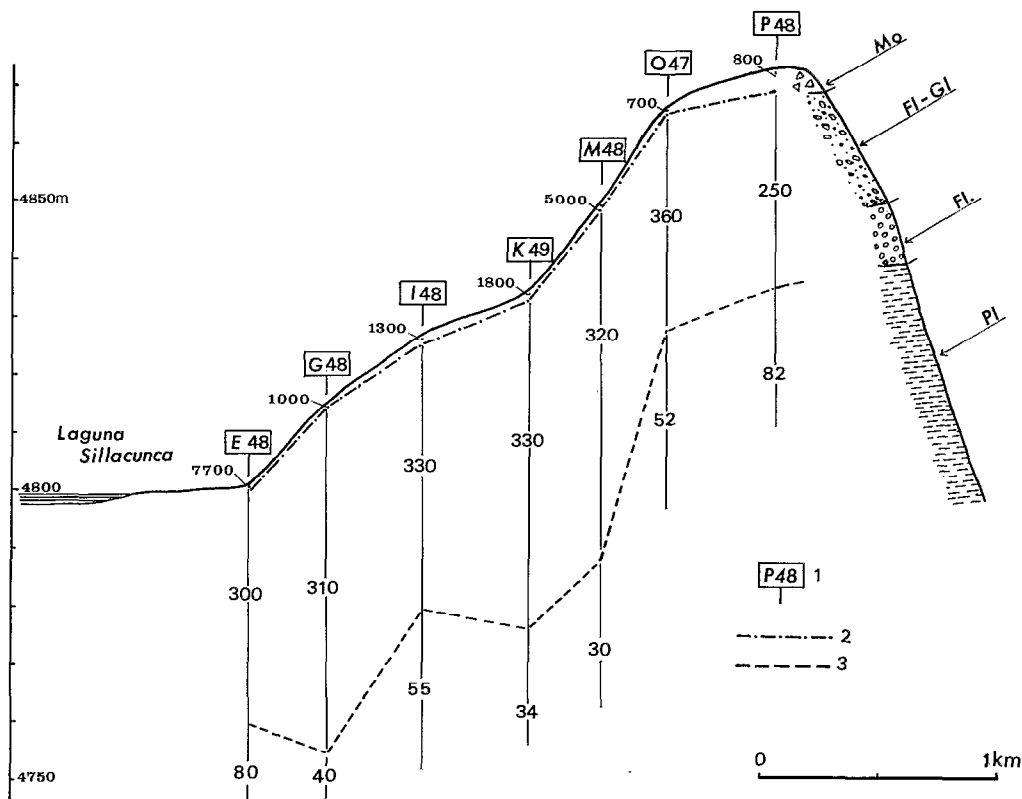


Fig. 7. — Perfil geoelectrico transversal N065°E, correlacionado con el corte de la quebrada Cuellaccacca (vease ubicación en fig. 3) ; en este perfil se diferencia bien el material palustre de los depósitos fluviales, fluvio-glaciales y glaciales subyacentes. 1 = sondeo eléctrico ; 2 y 3 = límites de los pisos geoelectricos calculados. Mo : morrenas, suelos y coberturas removidas ; Fl-Gl : fluvio-glacial ; Fl : aluvial ; Pl : palustre.

Profil géoelectrique transverse N065°E, corrélé avec la coupe de la quebrada Cuellaccacca ; il montre une bonne ségrégation entre le matériel palustre d'une part et les dépôts susjacentes alluviaux, fluvio-glaciaires et glaciaires d'autre part. 1 = sondage électrique ; 2 et 3 = limites interprétées des formations géoelectriques. Mo : moraines, sols et épandages superficiels ; Fl-Gl : fluvio-glaciaire ; Fl : alluvial ; Pl : palustre.

superior de la formación Arco-Aja que quedan conservados en los bordes oeste y este de la depresión de Pampa Blanca. Los isopacos dibujan una depresión alargada NS con un estrecho corredor (puntos O/46 y Q/42) que se divide en 2 hacia el S. Estas estructuras, cuya geometría sugiere también transportes del norte hacia el sur, concuerdan aproximadamente con la faja "conductora" definida en el mapa (fig. 6). El espesor de los depósitos, generalmente del orden de 20 a 50 metros, es mayor por encima de estos paleovalles donde se calcula, en el punto K/46, un espesor máximo de 70.9 m. Los depósitos fluvio-glaciales se caracterizan por un gradiente verdadero muy parecido al gradiente de resistividades aparentes, ya discutido más arriba.

En función de los espesores de los depósitos glaciales obtenidos en los perfiles y de la superficie del área, se ha hecho un cálculo de volumen mediante el método de bloques simplificados. Solo para la zona de Pampa Blanca, cubierta por los sondeos eléctricos, se llega a un volumen mínimo de 440 000 000 de metros cúbicos de material glacial y fluvio-glacial potencialmente aurífero.

CONCLUSIONES

En la zona prospectada, el método Schlumberger se reveló muy adecuado para la determinación de la geometría de las formaciones recientes. Los resultados son de buena calidad sobre todo cuando las capas buzan levemente, los espesores no superan los 150 metros y los contrastes litológicos son marcados entre las formaciones.

Una calibración de los datos geoelectricos por la geología pudo realizarse gracias a dos sondeos hechos en la proximidad inmediata del corte naturel de Ccuellaccacca. Un sondeo en cruz y una línea de sondeos distantes de 250 metros constituyen controles adicionales que, combinados a los datos geológicos, comprobaron la coherencia general de las interpretaciones propuestas. Sin embargo, no obstante la calidad de los datos, su precisión no debe estimarse en menos del 10 a 15 %.

Los fuertes contrastes de resistividades medidas, reflejando importantes diferencias litológicas, individualizan muy nítidamente 4 conjuntos geoelectricos: el substrato pizarroso de la formación Ananea

($\rho = 220$ a $730 \Omega \cdot m$), la formación palustre Arco-Aja ($\rho = 10$ a $80 \Omega \cdot m$) y una formación ($\rho = 90$ a $250 \Omega \cdot m$) que no aflora, pero que podría corresponder al miembro superior conglomerádico de la formación Arco-Aja (FORNARI *et al.*, 1982). La formación Arco-Aja sobrepasa 200 m de espesor en el sondeo I/50. Por encima, descansa todo el conjunto aurífero de los depósitos morrénicos, fluvio-glaciales, aluviales derivados, que no se diferencian electricamente entre ellos ($\rho = 195$ a $2\,000 \Omega \cdot m$ con ρ_m de $500 \Omega \cdot m$). Los isopacos de estos depósitos indican un piso irregular y dibujan una depresión de dirección submeridiana que corresponde a un paleovalle cavado, durante el Cuaternario antiguo, en la formación Arco-Aja, sea por un potente glaciar (glaciación Limata?), sea por un río, ambos procedente del macizo de Ananea al norte. Los depósitos fluvio-glaciales, de hasta 70 m de espesor, fosilizan esta paleotopografía. El cálculo del volumen aproximado de estos depósitos potencialmente auríferos llega a 440 000 000 metros cúbicos en Pampa Blanca. Pero una exploración y una evaluación más profundizada del potencial aurífero de Pampa Blanca implica la realización de perforaciones hasta el piso de los depósitos glaciales y derivados.

Agradecimientos

Este trabajo fué realizado en el cuadro del Convenio de Cooperación Técnica 1977-1980 firmado entre el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET) y el Institut français de Recherche scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM). Agradecemos al BRGM cuya oficina en Lima nos prestó un resistivímetro RUE/4 sin el cual se hubiera difícilmente podido llevar a cabo el presente estudio.

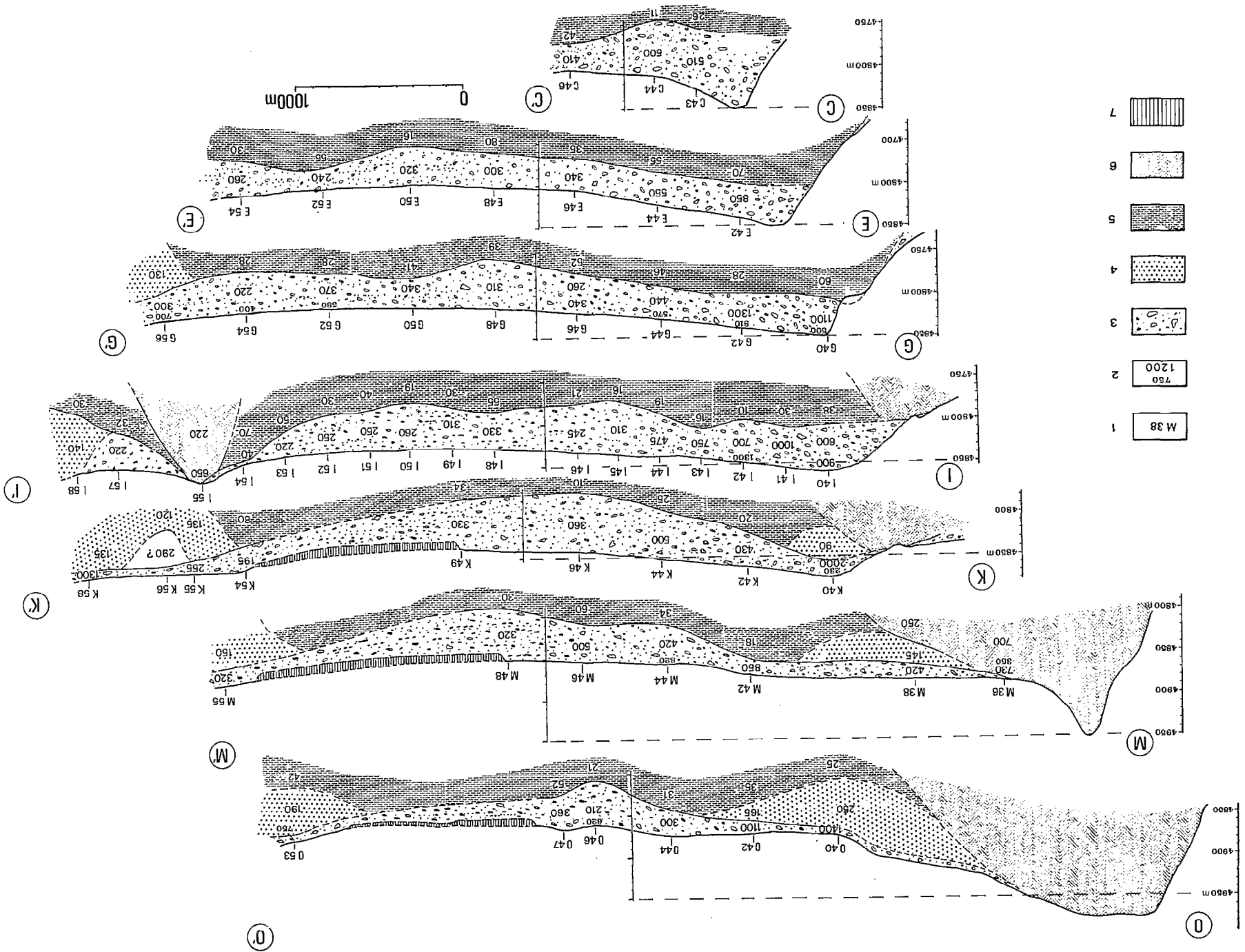
Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 1^{er} août 1990.

APENDICE

EQUIPOS INSTRUMENTALES

Para realizar la prospección se utilizaron simultáneamente dos equipos completos previamente controlados y calibrados juntos en un mismo punto de sondeo (I/50). El primer equipo comprendía un resistivímetro BRGM, modelo RUE/4 (sensibilidades de 0.01 mA y 0.001 mV) que estaba alimentado por una batería en serie de 5 pilas secas de 90 V. El segundo equipo comprendía un resistivímetro artesanal fabricado por J.L. GELOT (sensibilidades de 1 mA y 0.1 mV) y que estuvo alimentado por un generador eléctrico y un convertidor de 30 VA. Con el primer equipo se realizaron 51 sondeos y 13 con el segundo.

- 7
- 6
- 5
- 4
- 3
- 2
- 1



REFERENCIAS

- BONHOMME (M.), FORNARI (M.), LAUBACHER (G.), SEBRIER (M.) and VIVIER (G.), 1988. — New cenozoic K-Ar ages of volcanic rocks of the eastern High Andes, South Peru. *J. of South Amer. Earth Sci.*, 1 : 179-183.
- BONNEMAISON (M.), FORNARI (M.), GALLOSO (A.), HERAIL (G.), JUNGBLUTH (R.), LAUBACHER (G.), VERGARA (J.) y ZEGARRA (J.), 1983. — Oro primario y oro detrítico en la Cordillera suroriental del Perú. El papel de la geomorfogénesis en la formación de los placeres. Informe final, parte U. Convenio ORSTOM-INGEMMET (1980-1983), Perú, 84 p.
- BONNEMAISON (M.), FORNARI (M.), GALLOSO (A.), GRANDIN (G.), HERAIL (G.), JUNGBLUTH (R.), LAUBACHER (G.), RODRIGUEZ (W.), VERGARA (J.) y ZEGARRA (J.), 1985. — Evolución geomorfológica y placeres de oro en los Andes surorientales del Perú. *Bol. Soc. Geol. Perú.* 75 : 13-32.
- CAGNIARD (L.), 1952. — Geophysical methods of locating groundwater. Congrès sur l'hydrologie de la zone aride. Ankara, UNESCO, 184-190.
- CARN (M.), VALDIVIA (E.), GELOT (J.L.), MACEDO (O.) y DELGADO (M.), 1980. — Prospección eléctrica en los depósitos auríferos de la zona de Ananea (Departamento de Puno). Acción Conjunta INGEMMET-ORSTOM, Informe Técnico, Lima, 17 p.
- DAVIS (P.A.), 1979. — Interpretation of Resistivity Sounding Data. Computer Programs for Solution to the Forward and Inverse Problems. University of Minnesota, *Report*, 16 p.
- DELAUNE (M.), FORNARI (M.), HERAIL (G.), LAUBACHER (G.) y ROUHIER (M.), 1989. — Correlation between heavy mineral distribution and geomorphological features in the Plio-Pleistocene sediments of the Peruvian Eastern Cordillera through principal component analysis. *Bull. Soc. Géol. France*, sér., 5 : 133-144.
- DOBROVOLNY (E.), 1962. — Geología del valle de La Paz. Dpt. Nac. Geol. Minist. Min. Petr. Bol. Nº 3 esp., 153 p.
- FORNARI (M.), GRANDIN (G.), HERAIL (G.), JUNGBLUTH (R.), LAUBACHER (G.), RODRIGUEZ (W.), VERGARA (J.) y ZEGARRA (J.), 1980. — Proyecto Oro. Informe técnico sobre las investigaciones realizadas desde mayo 1979 hasta mayo 1980. Convenio ORSTOM-INGEMMET 1977-1980, 45 p., 2 mapas geomorfológicos.
- FORNARI (M.), GRANDIN (G.), HERAIL (G.), JUNGBLUTH (R.), LAUBACHER (G.), RODRIGUEZ (W.), VERGARA (J.) y ZEGARRA (J.), 1981. — Las mineralizaciones auríferas en la Cordillera suroriental del Perú : el papel de la evolución geomorfológica en formación de los placeres. Informe Final parte II. Convenio INGEMMET-ORSTOM 1977-1980, Lima, 74 p.
- FORNARI (M.), HERAIL (G.), LAUBACHER (G.), 1982. — El oro en la Cordillera suroriental del Perú : el placer fluvio-glacial de San Antonio de Poto (Dpto de Puno) y sus relaciones con la mineralización primaria de la Rinconada. Quinto Congr. Latinoamericano Geol., Buenos-Aires, Actas 4 : 369-386.
- FORNARI (M.) y BONNEMAISON (M.), 1984. — Mantos et amas sulfo-arseniés à or : La Rinconada, premier indice de minéralisation de type exhalatif-sédimentaire dans la Cordillère orientale du Pérou. *Chron. Rech. Min.* 474 : 33-40.
- FORNARI (M.), HERAIL (G.), LAUBACHER (G.) y DELAUNE (M.), 1988. — Les gisements d'or des Andes sud-orientales du Pérou. *Géodynamique* 3 : 139-161.
- KOEFOED (O.), 1979. — Geosounding Principles - 1. Resistivity sounding measurements. Elsevier, 276 p.
- LASFARGUES (P.), 1957. — Prospection électrique en courant continu. Masson, Paris, 290 p.
- LAUBACHER (G.), 1978. — Géologie de la Cordillère orientale et de l'Altiplano au nord et au nord-ouest du lac Titicaca (Pérou). *Trav. Doc. ORSTOM* 95 : 1-217.
- LAUBACHER (G.), BONHOMME (M.), FORNARI (M.), HERAIL (G.) et VIVIER (G.), 1984. — Le bassin d'Ananea-Ancocala, témoin de l'évolution plio-quaternaire des Andes sud-orientales du Pérou. 10^e Réunion. Ann. Sci. Terre, Bordeaux. Résumés : 336.
- LAVENU (A.), 1986. — Étude néotectonique de l'Altiplano et de la Cordillère orientale des Andes boliviennes. Thèse de Doct. d'État, Université de Paris-Sud, Orsay, 434 p.
- ORRELLANA (E.), 1972. — Prospección eléctrica en corriente continuá. Paraninfo, Madrid, 523 p.
- PASCAL (G.), 1970. — Étude expérimentale de l'emploi des abaque auxiliaires pour l'interprétation des sondages électriques. *Cah. ORSTOM, sér. Géophys.* 10 : 3-38.
- RIJKSWATERSTAAT, 1975. — Standard Graphs for Resistivity Prospecting. Published by the European Association of Exploration Geophysists, The Netherlands.
- SAENZ CHAVEZ (T.), 1964. — Explotación en depósitos aluviales mediante el sistema de draga (distrito de Poto, Prov. de Sandía, Dpto de Puno). Tesis Bachiller, UNSA, Arequipa.
- SERVANT (M.), 1977. — Le cadre stratigraphique du Plio-Quaternaire des Andes tropicales de Bolivie. *INQUA, suppl. au Bull. A.F.E.Q.*, 1 : 323-327.
- SCHLUMBERGER (C.), 1920. — Étude sur la prospection électrique du sous-sol. Gauthier-Villard, Paris.